摩擦攪拌プロセッシングを利用したポーラスアルミニウムの作製

Fabrication of Porous Aluminum by Friction Stir Processing

半谷 禎彦*
Yoshihiko HANGAI

Key Words: Foam, Friction Stir Welding, Functionally Graded Materials, Sandwich Structure, Sintering

1. 緒言

気孔がアルミニウム (Al) 中に多く存在しているポーラス Al は、軽量性・衝撃吸収性・防音性・断熱性等に優れた素材である。ポーラス Al の作製方法は様々提案されているが^{1)~5)}、本稿では摩擦攪拌プロセッシング (friction stir processing, FSP) を利用したプリカーサ法とスパーサー法を紹介する。

プリカーサ法は、Al 中に発泡剤粉末を均一に分散したプリカーサをあらかじめ作製し、そのプリカーサを加熱することで、発泡剤の分解によりガスを発生させ、軟化した Al 中に気孔を生成する方法である。従来、プリカーサは Al 粉末と発泡剤粉末を混合焼結する粉末冶金法により作製されてきた^{6)~8)}。著者らは、FSP を利用することで Al 板材からプリカーサを作製できることを見出した^{9)~10)}。FSP の強力な攪拌作用を利用して Al 板材中に発泡剤粉末を混合しプリカーサを作製するものである。プリカーサ法により作製したポーラス Al は、気孔 1 つ 1 つが閉空間となり独立に存在するクロズドセル構造を有しており、Fig. 1 に示すように、水にも浮くような Al 構造体となる。また、FSP は摩擦攪拌接合 (friction stir welding, FSW) を基にした方法であ

Fig. 1 Ultralight porous Al.

るため、FSP 中に接合も行うことができ、ポーラス Al の複合化も容易である。本稿ではその一例として、傾斜機能ポーラス Al と、ポーラス Al をコア材としたサンドイッチパネルを紹介する。

スパーサー法は、Al 粉末とスパーサー粉末を混合焼結し、得られた焼結体からスパーサーを取り除くことで、気孔を生成する方法である^{11),12)}。著者らは、混合粉末の焼結を FSP により実現できることを見出した^{13),14)}。ツール走査時に発生する摩擦熱と押込み荷重により焼結を行うものである。スパーサー法により作製したポーラス Al は、それぞれの気孔がつながった連通気孔となっておりオープンセル構造を有している。ツールを走査させるだけで焼結が可能であるため、任意の大きさのポーラス Al が得られる。本稿では、マルチパス FSP により作製したポーラス Al 板を紹介する。

2. FSP を利用したプリカーサ法

2.1 ポーラス Al 作製方法^{9),10)}

Fig. 2 に FSP を利用したプリカーサ法によるポーラス Al 作製方法の概略を示す。まず、Fig. 2(a) に示すように、2 枚のアルミニウム板材の間に発泡剤粉末 (本研究では、水素化チタン、 TiH_2) を散布し積層板とする。次に、Fig. 2(b), (c) に示すように、積層板の発泡剤粉末散布領域全体に対して FSP を行う。プローブ長さは通常の FSW と同様、バックプレートに接触しない程度に、積層板の厚さより少しだけ短いツールを使用し、板厚方向に均一に発泡剤粉末が攪拌されるようにする。また、Fig. 2(c) に示すようにマルチパス FSP を適用し、大きなプリカーサを作製するために複数列のマルチパス FSP、および発泡剤粉末を均一に混合するために同一個所を複数回攪拌するマルチパス FSP の両方を行う。その後、Fig. 2(d) に示すように、FSP により攪拌された領域から機械加工によりプリカーサを切り出し、得られたプリカーサを加熱発泡させることで、Fig.

*群馬大学 大学院理工学府 知能機械創製部門 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1)
Division of Mechanical Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Gunma University
(1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan)

Fig. 2 Schematic illustration of fabrication process for porous Al by FSP (precursor process).

Fig. 3 Porous Al fabricated using Al alloy die-castings (a) without blowing agent and (b) with blowing agent¹⁷⁾.

2(e) に示すようなポーラスアルミニウムを得る。

2.2 発泡剤不使用ポーラス Al¹⁵⁾⁻¹⁷⁾

Al 合金ダイカスト製品は、自動車部品等に広く用いられているが、内部にある量のガスが混在している。このガスは、離型剤や潤滑剤が Al 溶湯と反応してガス化したものや、金型内に存在していた空気などに由来している。著者らは、このガスを発泡源として利用することで、発泡剤を用いることなくポーラス Al が作製できることを見出した。Al 合金ダイカスト中のガスによる気孔の生成はプリスター試験などで知られているが、偏析しておりそのままではポーラス Al としては利用できない。そこで、Al 合金ダイカスト板材に FSP を行うことで、ガスが均一に混合したプリカーサとなり、均一な気孔分布を持つポーラス Al が作製できる。作製方法の概略は Fig. 2 に示す工程とほぼ同様であるが、用いる板材が Al 合金ダイカスト板材である点、および発泡剤粉末を使用しない点に特徴がある。

Fig. 3 に Al 合金ダイカストから発泡剤を使用せずに作製したポーラス Al と、同じ Al 合金ダイカストに発泡剤を混合して作製したポーラス Al の X 線 CT 断層画像を示す¹⁷⁾。発泡剤を使用しないポーラス Al は、発泡剤を使用したポーラス Al と比較して、細かい気孔となっている。これは、Al 板材中に含有できるガス量には限界があり、発泡剤を用いる場合に比べると、発泡に使えるガス量が少ないためと考えられる。また、Al 合金ダイカスト板材中に含まれるガス

量と作製されるポーラス Al の気孔率（ポーラス Al 中の気孔の体積割合：気孔率が高いほど密度が低い）には相関があるが¹⁵⁾、Al 板材中に含有できるガス量の限界により、気孔率 90 % 程度以上の高気孔率ポーラス Al を作製することは困難である。

2.3 傾斜機能ポーラス Al¹⁸⁾⁻²¹⁾

Fig. 4 に傾斜機能ポーラス Al 作製法の概略を示す。ここでは、工業用純 Al の A1050 板材と Al-Mg-Si 系 Al 合金の A6061 板材の組合せによる A1050/A6061 傾斜機能ポーラス Al の作製例を示す。まず、FSP により A1050 および A6061 それぞれのプリカーサを Fig. 2 に示した方法で別々に作製する (Fig. 4(a), (b))。次に、Fig. 4(c) に示すように、それぞれ作製したプリカーサを FSW により突合せ接合し、それを加熱発泡させることで、A1050/A6061 傾斜機能ポーラス Al が得られる。ここで、Fig. 4(a), (b) のように別々に FSP を行わず、あらかじめ Fig. 4(c) のように並べておいて FSP と FSW を同時に行うことも可能であるが、接合部近傍の攪拌回数が多くなるため、A1050 と A6061 の境界領域（混合領域）が若干広くなる。

Fig. 5(a) に作製した A1050/A6061 傾斜機能ポーラス Al の外観を示す¹⁸⁾。外観からは、A1050 層と A6061 層はほとんど見分けがつかないが、上層が A1050、下層が A6061 となっている。他にも、同一の Al 合金を用いて混合する発泡剤量を調整することにより、気孔形態のみが変化する傾斜機能ポーラス Al も作製することができる。Fig. 5(b), (c) は、Fig. 3 で示した発泡剤を混合しないポーラス Al (0 mass%) と混合したポーラス Al (1 mass%) を 2 層^{19),20)}、あるいは 3 層²¹⁾ に組み合わせたものである。このような傾斜機能ポーラス Al は、圧縮変形時に低強度層 (A1050 層や発泡剤 1 mass% 層) から変形が開始し、ある程度変形した後、高強度層 (A6061 層や発泡剤 0 mass% 層) の変形が開始するといった変形制御が可能である。また、それぞれの層の変形時に、それぞれの層の力学特性が発現するため、複数の力学特性を 1 つのポーラス Al で実現でき、力学特性の制御も可能である。

2.4 サンドイッチパネル²²⁾⁻²⁵⁾

ポーラス Al は優れた圧縮衝撃吸収特性を有するが、気孔

Fig. 4 Schematic illustration of fabrication process for functionally graded porous Al by FSP (precursor process).

Fig. 5 (a) A1050/A6061 functionally graded porous Al¹⁸⁾.
(b) Two layered functionally graded porous Al varying porosity¹⁹⁾.
(c) Three layered functionally graded porous Al varying porosity²¹⁾.

Fig. 6 Schematic illustration of fabrication process for porous Al/dense plate composite by FSP (precursor process).

が多くを占め Al 部の断面積が少ないことから、引張強度や曲げ強度は低いといった問題があった。これを解決するために、緻密板材と組み合わせた複合化が有効と考えられる。

Fig. 6 にポーラス Al と緻密板材との複合化の手順を示す。Fig. 2 に示した Al 板材に発泡剤を混合する工程と、ほぼ同工程で作製することができるが、Fig. 6(a) に示すように Al 板材積層板の下に緻密板材となる板材をバックプレートのように敷いておく点に特徴がある。Fig. 6(b), (c) に示す FSP の際に、緻密板材の表面をわずかにプローブ先端で

擦らせることで（本研究の場合、ツール先端の押込み量 0.2 mm 程度）、Fig. 6(d) に示すようにプリカーサの作製と同時にプリカーサと緻密板材との接合も達成できる。これを加熱発泡させることで、Fig. 6(e) に示したような金属接合による複合部材を作製することができる。この加熱発泡の際に、2つのプリカーサを対面させて発泡させることで、Fig. 7 に示すようなサンドイッチパネルを作製することができる。ポーラス Al をコア材としたサンドイッチパネルにより、水に浮くような軽量性を維持したまま、引張強度や曲げ強

Fig. 7 Ultralight porous Al/Al plates sandwich panel.

度の向上を達成することができる。

従来サンドイッチパネルは、あらかじめ作製しておいたポーラス Al に接着剤で緻密板材を接着することで作製されていた²⁶⁾。接着剤の使用は、簡便にサンドイッチパネル化が可能であるが、接着工程が不可欠であるとともに、耐久性やリサイクル性が懸念される。また、金属接合によるサンドイッチパネル化を実現する方法として、あらかじめ作製しておいたプリカーサと緻密板材をクラッド接合し、それを加熱発泡させる方法が提案され実用化されているが^{8),27)}、プリカーサと緻密板材とのクラッド接合工程が増える。FSP の利用によりプリカーサの作製と同工程で緻密板材との接合が可能となれば、工程数を削減でき、低コスト化につながると期待される。

Fig. 8 にポーラス Al と緻密鋼板のサンドイッチパネルにおける接合界面の組織を示す。プリカーサの段階では FSW により数 μm の金属間化合物が生成するが²⁸⁾、加熱発泡工程により、数十 μm の Fe_2Al_3 や FeAl_3 などの金属間化合物層が生成する²²⁾。脆い金属間化合物層の生成は界面強度を低下させることが懸念される。Fig. 9 にポーラス部の気孔率が 79.6 % のサンドイッチパネルの引張試験の様子を示す²²⁾。破断はポーラス Al 部で起こっており、ポーラス Al と緻密板材の界面では、き裂などの損傷は見られない。これは、本手法で作製可能なポーラス Al 部の気孔率 55–85 % のサンドイッチパネルのうち、気孔率が 65 % 以上の場合全てについて同様の傾向を示しており、数十 μm の金属間化合物層が生成しても、強固な界面を有するサンドイッチパネルが作製できる²³⁾。また、緻密板材が Al 板材の場合、気孔率 50–80 % のもの全てについて同様の傾向であり、強固な界面を有するオールアルミニウムのサンドイッチパネルが作製できる²⁴⁾。

3. FSP を利用したスペーサー法^{13),14)}

Fig. 10 に FSP を利用したスペーサー法によるポーラス

Fig. 8 (a) X-ray CT image of porous Al/SPCC steel plates sandwich panel. (b) Microstructure of interface between porous Al and SPCC steel plate²²⁾.

Fig. 9 Tensile test of porous Al/SPCC steel plates sandwich panel of (a) initial state and (b) final state²²⁾.

Al 作製方法の概略を示す。Fig. 10(a) に示すように、まず作製するポーラス Al と同じ大きさの貫通穴を開けた金属板 C (本研究では熱伝導性に優れる銅板) を用意する。その貫通穴に、Al 粉末とスペーサー粉末 (本研究では、水への溶解度の高い塩化ナトリウム (NaCl) 粉末) の混合粉末を投入し、上板 A と B をかぶせる。上板を使用することで、ツール走査中の振動で混合粉末が貫通穴から出ないようにするとともに、ツールの回転力により気孔の形状が変形することを防ぐ。次に、Fig. 10(b) に示すように、その上からツール走査を行い、発生する摩擦熱と押込み荷重により粉末の焼結を行う。また、幅広のポーラス Al を作製するために、Fig. 10(c) に示すように、マルチパス FSP を適用し複数列および同一個所を複数回のツール走査を行う。最後に、Fig. 10(d) に示すように、焼結体から NaCl を水洗により除去することで、NaCl が存在していた個所が気孔となり、Fig. 10(e) に示すように、金属板 C の貫通穴と同じ大きさのポーラス Al が得られる。

Fig. 11 に実際に得られたポーラス Al を示す¹⁴⁾。各個所から切り出した試験片の、X 線 CT による気孔観察と圧縮試験から、どの位置においても、ほぼ均一な気孔形態とほぼ同様の力学特性を有するポーラス Al 板が得られることが分かっている。また、圧縮試験時に焼結不足による崩れるような変形挙動がほとんど見られないことから、試料全体

Fig. 10 Schematic illustration of fabrication process for porous Al by FSP (spacer process).

Fig. 11 Porous Al plate fabricated by multi-pass FSP (spacer process)¹⁴⁾.

で均一に同程度の焼結が可能である。更に、従来の加熱炉などを使用して焼結し作製したポーラス Al の圧縮特性とほぼ同様の傾向を示すことから、十分な焼結が可能である¹⁴⁾。

本手法は、焼結が必要な個所に限定して摩擦熱により加熱するため、省エネルギーな手法であると考えられる。また、通常の加熱炉を用いた従来法と比較して、短時間のプロセスで焼結が可能であるため、生産性および省エネルギー性に優れた手法であると期待される。Al 以外にも、ツールの垂直押込みのみによるスポット FSP で銅のポーラス化も可能であることが分かっている²⁹⁾。本手法で作製されたポーラス銅は、オープンセル構造を有し比表面積が大きい¹⁴⁾ため、ヒートシンクなどへの応用も期待される。

4. 結言

本稿では、FSP を利用したポーラス Al の作製について紹介した。FSP をプリカーサ法に適用することで、FSP の強力な攪拌力を用いて、Al 板材中に発泡剤粉末を均一に分散させたプリカーサが作製できる。FSP を利用することで、種々の特性を有する Al 板材からプリカーサを作製できるとともに、FSW を用いてそれらプリカーサを組み合わせ接合

することで、傾斜機能化できる。板材からポーラス Al が作製できるため、低コスト化が図られると考えられる。課題として、粉末の攪拌はツールの摩耗を促進するため、耐久性のある非消耗ツールの開発が待望される。また、攪拌力を大幅に向上可能なツールが開発できれば、ツール走査の高速化やツール走査回数の低減などが図られ、生産性の向上が期待できる。FSP をスペーサー法に適用することで、FSP の摩擦発熱現象と押込み荷重を用いて、ツール走査のみで粉末の焼結が可能で、ポーラス Al が簡便に作製できる。

本特集号において、FSP の最新技術が紹介されているが、FSP 技術の進歩をポーラス Al の作製に取り入れることで、更なる生産性の向上や低コスト化につながることを期待される。本稿が、FSP の使い方の 1 つとして、読者の皆様の参考になれば幸いであるとともに、本特集号を契機として、FSP 技術が益々進展することを願っている。

謝辞

本研究の一部は、大阪大学接合科学研究所「接合科学共同利用・共同研究拠点」共同研究員制度の一環として行われ、機能評価研究部門・機能性診断学分野の藤井英俊先生、上路林太郎先生、孫玉峰先生、森貞好昭先生には、有意義なディスカッションやご助言をいただきました。ここに記して、厚く感謝いたします。

引用文献

- 1) J. Banhart: Prog. Mater. Sci. **46** (2001) 559-632.
- 2) 小橋眞：軽金属 **55** (2005) 327-332.
- 3) 中嶋英雄監修：マクロおよびナノポーラス金属の開発最前線、(シーエムシー出版、東京、2011)。
- 4) 金武直幸、小橋眞：軽金属 **62** (2012) 122-134.
- 5) J. Banhart: Adv. Eng. Mater. **15** (2013) 82-111.
- 6) F. Baumgartner, I. Duarte, J. Banhart: Adv. Eng. Mater. **2** (2000) 168-174.
- 7) 小橋眞、棚橋伸也、金武直幸：軽金属 **53** (2003) 427-432.
- 8) J. Banhart, H. W. Seeliger: Adv. Eng. Mater. **14** (2012) 1082-1087.
- 9) 半谷禎彦、宇都宮登雄：日本金属学会誌 **73** (2009) 131-133.

- 10) Y. Hangai, T. Utsunomiya, M. Hasegawa: J. Mater. Process. Technol. **210** (2010) 288-292.
- 11) Y. Y. Zhao, D. X. Sun: Scr. Mater. **44** (2001) 105-110.
- 12) 袴田昌高、馬渕守：軽金属 **62** (2012) 313-321.
- 13) Y. Hangai, K. Zushida, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa: J. Mater. Process. Technol. **214** (2014) 1721-1727.
- 14) 半谷禎彦、圖子田幸佑、桑水流理、吉川暢宏：日本機械学会論文集 **81** (2015) 14-00600.
- 15) Y. Hangai, H. Kato, T. Utsunomiya, S. Kitahara: Metall. Mater. Trans. A **41** (2010) 1883-1886.
- 16) 半谷禎彦、加藤弘規、宇都宮登雄、北原総一郎：日本金属学会誌 **74** (2010) 697-699.
- 17) 半谷禎彦、高橋和也、加藤弘規、宇都宮登雄、北原総一郎、桑水流理、吉川暢宏：日本金属学会誌 **75** (2011) 465-467.
- 18) Y. Hangai, K. Saito, T. Utsunomiya, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa: Mater. Sci. Eng. A **613** (2014) 163-170.
- 19) Y. Hangai, K. Takahashi, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa: Mater. Sci. Eng. A **534** (2012) 716-719.
- 20) Y. Hangai, K. Takahashi, R. Yamaguchi, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa: Mater. Sci. Eng. A **556** (2012) 678-684.
- 21) Y. Hangai, H. Kamada, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa: Mater. Trans. **54** (2013) 1268-1273.
- 22) Y. Hangai, N. Ishii, S. Koyama, T. Utsunomiya, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa: Mater. Trans. **53** (2012) 584-587.
- 23) T. Utsunomiya, N. Ishii, Y. Hangai, S. Koyama, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa: Mater. Trans. **53** (2012) 1674-1679.
- 24) 宇都宮登雄、石井伸幸、半谷禎彦、小山真司、北原総一郎、桑水流理、吉川暢宏：日本金属学会誌 **77** (2013) 385-390.
- 25) Y. Hangai, H. Kamada, T. Utsunomiya, S. Kitahara, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa: J. Mater. Process. Technol. **214** (2014) 1928-1934.
- 26) 三好鉄二、濱田猛、金橋秀豪：R&D 神戸製鋼技報 **57** (2007) 95-100.
- 27) J. Banhart, H. W. Seeliger: Adv. Eng. Mater. **10** (2008) 793-802.
- 28) Y. Hangai, S. Koyama, M. Hasegawa, T. Utsunomiya: Metall. Mater. Trans. A **41** (2010) 2184-2186.
- 29) Y. Hangai, K. Zushida, H. Fujii, R. Ueji, O. Kuwazuru, N. Yoshikawa: Mater. Sci. Eng. A **585** (2013) 468-474.